

논문 2009-6-1

레이레이 페이딩 채널에서 기회전송 릴레이 시스템의 최적 전력 할당

Optimal Power Allocation of Opportunistic Transmission Relay Systems in Rayleigh Fading Channel

김남수*

Nam-Soo Kim

요 약 최근에 많은 연구가 진행되고 있는 무선 ad-hoc 네트워크는 전력 제한 시스템이기 때문에 전력 절약은 ad-hoc 네트워크의 매우 중요한 연구 주제 중 하나이다. 그러므로 본 논문에서는 무선 ad-hoc 네트워크에 기회전송 릴레이(Opportunistic transmission relay) 시스템을 적용하였을 때, 전체 시스템의 오수신율이 최소가 되도록 제한된 전력을 각 송신 노드에 최적으로 할당하는 방법에 관하여 제안하고 각 값들을 수식적으로 유도하였다. 유도한 결과는 각 노드들에 동일한 전력을 할당할 때보다 시스템의 오수신 특성이 항상 우수하였다.

Abstract Though the wireless ad-hoc network which is recently highly focused is power limited network, one of the main research topic is power saving. We propose a optimal power allocation strategy and derive the optimal power of the opportunistic transmission relays for minimum outage probability of the power limited network. It is shown that the proposed optimal power allocation has always better performance than that of the equal power allocation.

Key Words : 기회전송, 릴레이, 무선 채널, Rayleigh 페이딩, 전력할당

I. 서 론

Ad-hoc 네트워크는 필요에 의하여 네트워크를 임의로 형성하고 소멸시키기 쉬운 장점을 갖고 있기 때문에 최근에 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, ad-hoc 네트워크는 군사적인 작전이나 재난 상황, 그리고 센서 네트워크에 응용을 하기 위하여 많은 관심을 받고 있다. 그러나 대부분의 ad-hoc 네트워크는 2차 전지에 의하여 전력을 공급받고 있기 때문에 고정 네트워크에 비하여 전력의 제한이 있는 시스템이다.

Ad-hoc 네트워크는 일반적으로 릴레이에 의하여 통신 링크를 형성하는데, 최근에는 무선채널에서 발생하는 페이딩의 영향을 여러 개의 릴레이를 이용하여 공간 다

이버시티를 이용하기위한 협동 다이버시티(Cooperative diversity)를 사용하는 방법이 많은 주목을 받고 있다[1]. 즉 송신기에 여러 개의 안테나를 사용하여 정보를 송신하면 무선 채널에서 발생하는 페이딩의 영향을 감소시켜서 수신 성능을 개선할 수 있는데, 협동 다이버시티는 여러 릴레이가 다수의 송신 안테나의 역할을 공간상에서 분담하여 가상의 안테나 역할을 수행함으로써 다이버시티 이득을 얻는 것이다.

특히, 기회전송 릴레이 (OTR, Opportunistic transmission relay) 시스템은 릴레이에서 수신한 평균 심호 대 잡음비(Signal-to-noise ratio, SNR)이 임계값보다 큰 경우만 송신하므로 모든 릴레이가 송신에 참여하는 협동 다이버시티 보다 채널간 간섭을 발생할 확률이 적어지며, 또한 송신하는 릴레이의 수가 적어지므로 소모 전력도 절약할 수 있는 방법이 된다[2],[3].

*정회원, 청주대학교 전자정보공학부
접수일자 2009.10.12, 수정일자 2009.11.5

대부분의 ad-hoc 네트워크가 전력제한을 갖기 때문에 네트워크의 소모전력을 최소화 하는 것이 최근의 연구 주제 중의 하나인데, 지금까지는 대부분 단순한 릴레이 전송 시스템에서 최적의 전력 할당에 관한 연구가 되었고[4],[5], 최근 기회전송 릴레이 시스템에서 네트워크 전체의 송신 전력이 제한되어있을 경우 최적의 전력 할당에 관한 연구가 진행되었다. 그러나 기회전송 릴레이 시스템에서 최적의 전력 할당을 연구한 논문들은 수신한 기회 전송 릴레이 (수신된 SNR이 임계값을 넘는 릴레이) 중에서 릴레이와 목적지간의 SNR이 가장 큰 하나의 릴레이만 송신하는 경우 소스와 릴레이의 송신전력을 최적화 하였다[6],[7]. 그러나 릴레이를 하나만 사용하는 경우에는 두 가지의 단점을 갖게 되는데 첫째, 목적지에서 수신한 SNR 이 가장 큰 릴레이를 선택하여 가장 큰 SNR을 갖는 릴레이로 피드백(feedback)정보를 주는 과정에서 지연이 발생하고, 이 때문에 시스템의 성능이 급격히 저하되는 현상이 발생하게 된다[7]. 둘째, 전체 네트워크의 송신전력이 소스와 한 개의 릴레이에 분배되므로 일반적으로 적은 송신전력을 갖는 ad-hoc 네트워크의 각 노드에서 전력 증폭기의 송신전력에 한계가 있어서 실제 시스템에서는 할당된 송신 출력을 송출할 수 없게 될 가능성이 많다.

따라서 본 논문에서는 공간 다이버시티 이득을 얻을 수 있고, 송신전력을 여러 개의 릴레이로 배분하여 하나의 릴레이에서 포화가 일어나지 않도록 하는 기회전송 릴레이 시스템을 대상으로 하여 최적의 전력 할당 방법을 연구하였다. 즉, 대상으로 하는 시스템 모델에서 네트워크의 전체 전력이 제한되어있는 경우, 시스템 전체의 종단 간(end-to-end) 오수신율을 최소화하기 위한 최적의 전력 할당 방식을 제안하고 각 송신 노드의 최적 송신 전력을 유도하였다. 그리고 제안한 최적의 전력 할당 방식과 각 노드의 송신전력이 고정되어있는 동일전력 할당 방식을 갖는 일반적인 기회전송 릴레이 시스템의 성능을 비교하여 제안된 전력할당 방식의 우수성을 보였다.

본 논문의 구성은 제2장에서 기회전송 릴레이 시스템을 설명하고, 평균 송신 릴레이 수와 종단 간 오수신율을 정의 하였다. 제3장은 네트워크 전체의 전력이 제한되었을 때 종단 간 오수신율을 최소화하기 위하여 각 송신 노드에 분배되는 최적의 전력 할당 방식을 제안하고 각 노드의 최적 송신전력을 유도하였다. 제4장은 수치적인 예를 보임으로써 주어진 조건하에서 종단 간 오수신율과

평균 송신 릴레이 수, 그리고 소스와 릴레이의 전력 할당 비등을 계산하고 물리적인 의미를 검토하였다. 마지막으로 제5장은 본 논문의 결론을 서술하였다.

II. 시스템 모델

이 절에서는 본 논문에서 고려하고자 하는 기회전송 릴레이 시스템의 모델을 설명하고, 릴레이 선택(Relay selection), 그리고 평균 송신 릴레이 수에 관하여 논의한다.

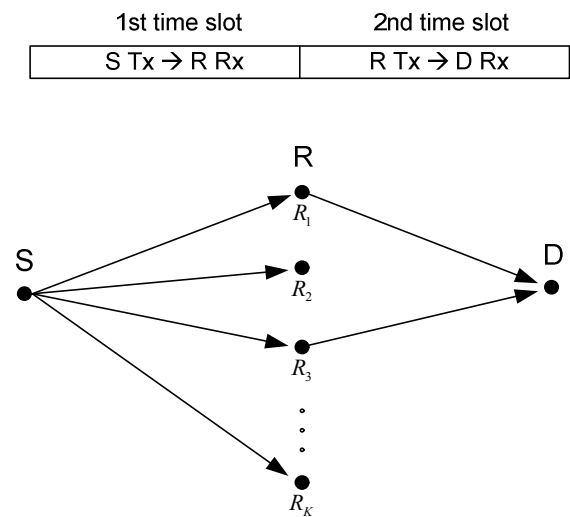


그림 1. 기회전송 릴레이 시스템 모델
Fig. 1. Opportunistic transmission relay (OTR) system model.

2.1 기회전송 릴레이 시스템 (OTRS)

그림 1은 시스템 모델을 나타낸 것인데, 여기서 S는 소스(source), R은 릴레이(relay), D는 목적지(destination)를 각각 나타낸 것이다. 1st time slot에서는 소스가 송신하고 릴레이가 수신한다. 2nd time slot에서는 릴레이가 송신하고 목적지에서 수신한다. 이때 각 릴레이는 시간, 주파수 또는 코드로 직교(orthogonal) 송신한다고 가정한다. 협동 다이버시티를 고려한 다수의 논문들은 소스로부터 수신된 정보를 모든 릴레이가 참여하여 목적지로 송신 할 때의 시스템 성능을 유도하였으나, 이 경우에는 시스템 내의 간섭 증가와 통신 자원을 효율적으로 활용하지 못하는 단점이 있었다[8],[9]. 기회전송 릴레이 통신은 릴레이 R_k ($k=1,2,\dots,K$)에서 수신된 신호 중 SNR이 미리 결정된 임계값보다 큰 릴레이만 송신하

므로 일반적인 협동 다이버시티의 단점인 시스템내의 간섭과 통신 자원의 활용도를 증가시키는 장점을 갖는다 [10].

1st time slot동안 k 번째 릴레이, $R_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 가 수신한 신호, y_{sk} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y_{sk} = h_{sk}x + n_k \quad (1)$$

여기서 h_{sk} 는 소스와 k 번째 릴레이 사이의 채널이득인데 Rayleigh 분포를 한다고 가정한다. 그리고 n_k 는 잡음으로 평균이 0 이고 분산이 N_0 인 가우시안(Gaussian) 분포를 한다. 또한 x 는 송신 신호이며 송신전력은 P_S 이다. 그러므로 k 번째 릴레이가 수신한 SNR, γ_{sk} , 은

$$\gamma_{sk} = |h_{sk}|^2 \frac{P_S}{N_0} \quad (2)$$

이다.

임의의 수신기에서 수신한 SNR, γ , 이 임계값 SNR보다 작은 경우를 오수신율(Outage probability)로 정의하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{out} = \Pr(\gamma < \gamma_{th}) \quad (3)$$

여기서 γ_{th} 는 미리 결정된 임계값 SNR 이다.

OTRS의 경우 수신한 SNR이 임계값 SNR보다 큰 릴레이 만 송신하게 되므로, 전체 K 개의 릴레이 중 k 개의 릴레이에서 수신한 SNR이 γ_{th} 보다 클 확률을 구하면,

$$\Pr(k) = \binom{K}{k} [1 - P_\gamma(\gamma_{th})]^k P_\gamma(\gamma_{th})^{K-k} \quad (4)$$

이 되고, 여기서 각 채널은 독립이고 동일한 (i.i.d) Rayleigh 페이딩 받는다고 가정하면,

$$P_\gamma(\gamma_{th}) = 1 - e^{-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{sk}} \quad (5)$$

이 된다. 그리고 수신한 SNR이 γ_{th} 보다 클 평균 릴레이 수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} M &= \sum_{k=0}^K k \Pr(k) \\ &= \sum_{k=0}^K k \binom{K}{k} [1 - P_\gamma(\gamma_{th})]^k P_\gamma(\gamma_{th})^{K-k} \end{aligned} \quad (6)$$

이 식은 Rayleigh 페이딩의 경우, [10]에 의하여

$$M = K e^{-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{sk}} \quad (7)$$

로 쓸 수 있다.

2.2 종단 간 오수신율

목적지에서 무선 채널에서 발생하는 페이딩의 영향을 감소시키기 위하여 공간 다이버시티(space diversity)를 채택하는데 가장 대표적인 결합방법으로 최대비 결합(Maximal ratio combining, MRC)과 선택 결합(Selection Combining, SC)을 가장 많이 사용한다. 일반적으로 MRC는 성능은 우수하나 수신기의 구조가 복잡하게 되는 단점이 있다[11]. 반면 SC는 수신한 신호 중 SNR이 가장 큰 것을 선택하기 때문에 MRC만큼 성능이 우수하지는 못하지만 수신기의 구조가 간단한 장점이 있다. Ad-hoc 또는 센서네트워크에서는 전력이 제한되어 있기 때문에 본 논문에서는 구조가 간단하고 전력소모가 적은 SC를 가정한다.

릴레이가 복조후 전송(Decode-and-forward, DF)한다고 가정하자. 이 때 목적지에서 최종 오수신율은

$$P_{out} = \sum_{k=0}^K P_{o, RD} \Pr(k) \quad (8)$$

여기서 $P_{o, RD}$ 는 k 개의 릴레이가 송신할 때 릴레이와 목적지 사이의 오수신율이며, SC 인 경우는

$$\begin{aligned} P_{o, RD} &= (P_{o, R_k D})^k \\ &= (1 - e^{-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{kd}})^k \end{aligned} \quad (9)$$

이다. 여기서 $P_{o, R_k D}$ 는 k 번째 릴레이가 목적지로 송신할 때의 오수신율이다. 그러므로

$$\begin{aligned}
 P_{out} &= \sum_{k=0}^K (1 - e^{-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{kD}})^k \binom{K}{k} (e^{-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{Sk}})^k (1 - e^{-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{Sk}})^{K-k} \\
 &= \prod_{k=1}^K [1 - e^{-\gamma_{th}(1/\bar{\gamma}_{Sk} + 1/\bar{\gamma}_{kD})}]
 \end{aligned} \tag{10}$$

이 된다. 이 식에서 두 번째 식은 [6]을 참조하였다. 그리고 $\bar{\gamma}_{Sk}$ 와 $\bar{\gamma}_{kD}$ 는 각각 소스- k 번째 릴레이, k 번째 릴레이-목적지 간의 평균 SNR이며 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \bar{\gamma}_{Sk} &= E[\gamma_{Sk}] = E[|h_{Sk}|^2] \frac{P_S}{N_0} = \Omega_{Sk} \frac{P_S}{N_0} \\
 \bar{\gamma}_{kD} &= E[\gamma_{kD}] = E[|h_{kD}|^2] \frac{P_{Rk}}{N_0} = \Omega_{kD} \frac{P_{Rk}}{N_0}
 \end{aligned} \tag{11}$$

이다. 여기서 $E[\cdot]$ 는 평균을 의미하고, γ_{Sk} 와 h_{Sk} 는 (2)에 정의 되어있다. γ_{kD} 는 k 번째 릴레이가 송신할 때 목적지에서 수신한 SNR, h_{kD} 는 k 번째 릴레이와 목적지 사이의 채널이득, 그리고 P_{Rk} 는 k 번째 릴레이의 송신전력이다. 또한 $\Omega_{Sk} = E[|h_{Sk}|^2]$, 그리고 $\Omega_{kD} = E[|h_{kD}|^2]$ 으로 각각 소스- k 번째 릴레이 및 k 번째 릴레이-목적지 간의 평균 채널전력 이득(Mean channel power gain)이다.

만일 전체 네트워크의 전력이 P_T 로 제한되어 있고, 각 노드의 송신전력이 동일하다(동일전력 할당 방식)고 가정하면 각 노드의 송신전력은

$$P_S = P_{Rk} = \frac{P_T}{K+1} \tag{12}$$

이 되며, (11)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \bar{\gamma}_{Sk, eq} &= \Omega_{Sk} \frac{P_T}{N_0(K+1)} \\
 \bar{\gamma}_{kD, eq} &= \Omega_{kD} \frac{P_T}{N_0(K+1)}
 \end{aligned} \tag{13}$$

(13)을 (10)에 대입하면 종단 간의 오수신율을 얻을 수

있고, (7)에 대입하면 모든 노드의 송신전력이 동일 할 때의 평균 송신 릴레이 수를 구할 수 있다.

$$M_{eq} = K e^{-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{Sk, eq}} \tag{14}$$

III. 최적 전력할당

앞장에서는 네트워크 전체의 송신전력이 제한되어 있을 때 각 노드의 송신전력이 동일한 경우를 고려하였다. 그러나 이 장에서는 전체의 송신전력이 제한된 동일한 조건에서, 종단 간의 오수신 확률을 최소화하기 위한 각 노드의 최적 전력 할당을 고려하자.

네트워크 전체의 송신전력은 소스의 송신전력과 릴레이들의 송신전력으로 이루어지므로,

$$P_T = P_S + P_R \tag{15}$$

으로 쓸 수 있고, 여기서 P_R 은 모든 송신 릴레이 전력의 합이다. 이때 소스 및 릴레이에 최적의 전력을 할당하기 위하여 다음을 고려하자.

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & P_{out} = \prod_{k=1}^K [1 - e^{-\gamma_{th}(1/\bar{\gamma}_{Sk} + 1/\bar{\gamma}_{kD})}] \\
 \text{Subject to} \quad & P_T = P_S + P_R \\
 & P_S, P_R > 0
 \end{aligned} \tag{16}$$

이 식에서 P_{out} 을 최소화하는 것은 $-\gamma_{th}(1/\bar{\gamma}_{Sk} + 1/\bar{\gamma}_{kD})$ 를 최대화 시키는 것과 같으므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Max} \quad & -\gamma_{th}(1/\bar{\gamma}_{Sk} + 1/\bar{\gamma}_{kD}) \\
 \text{Subject to} \quad & P_T = P_S + P_R \\
 & P_S, P_R > 0
 \end{aligned} \tag{17}$$

이제 Lagrange 곱 최대화 방식(Lagrange multiplier maximization method)을 이용하면, 목적함수는

$$J = -\gamma_{th} \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{Sk}} + \frac{1}{\bar{\gamma}_{kD}} \right) - \lambda(P_S + P_R - P_T) \quad (18)$$

이 되고, 이 식에서 $\bar{\gamma}_{Sk}$ 와 $\bar{\gamma}_{kD}$ 는 각각 (11)에 정의되어 있다. 기회전송 시에는 총 송신 릴레이 전력 P_R 는 송신하는 릴레이에만 동일하게 나누어진다고 가정하자. 그리고 평균 송신 릴레이 수를 M_{opp} 이라고 할 때 각 릴레이의 송신전력 $P_{Rk, opp}$ 은

$$P_{Rk, opp} = P_R / M_{opp} \quad (19)$$

이 된다. (11)의 P_{Rk} 대신에 (19)의 $P_{Rk, opp}$ 을 대입하고 정리하면, (18)은

$$J = -\gamma_{th} \left(\frac{N_0}{\Omega_{Sk} P_S} + \frac{M_{opp} N_0}{\Omega_{kD} P_R} \right) - \lambda(P_S + P_R - P_T) \quad (20)$$

이 되고, P_S, P_R 그리고 λ 로 각각 편미분 하여 0으로 놓고 풀면, 소스 노드의 최적의 송신전력 P_S^* 와 P_R^* 는 각각 다음 식과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} P_S^* &= P_T / \left(1 + \sqrt{\frac{M_{opp} \Omega_{Sk}}{\Omega_{kD}}} \right) \\ P_R^* &= P_T / \left(1 + \sqrt{\frac{\Omega_{kD}}{M_{opp} \Omega_{Sk}}} \right) \\ &= P_T - P_S^* \end{aligned} \quad (21)$$

그러므로 $\bar{\gamma}_{Sk, opp}$ 및 $\bar{\gamma}_{kD, opp}$ 는

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_{Sk, opp} &= \Omega_{Sk} \frac{P_S^*}{N_0} \\ \bar{\gamma}_{kD, opp} &= \Omega_{kD} \frac{P_R^*}{N_0 M_{opp}} \end{aligned} \quad (22)$$

이 되고, (22)를 (10)에 대입하면 중단 간 오수신율을

얻을 수 있다. 그리고 (7)에 대입하면 최적의 전력을 할당할 경우 평균 송신 릴레이 수는

$$\begin{aligned} M_{opp} &= K \exp \left(-\frac{\gamma_{th} N_0}{\Omega_{Sk} P_S^*} \right) \\ &= K \exp \left[-\gamma_{th} N_0 \left(1 + \sqrt{\frac{M_{opp} \Omega_{Sk}}{\Omega_{kD}}} \right) / P_T \right] \end{aligned} \quad (23)$$

이 되고, 이 식으로부터 M_{opp} 를 구해야 한다. Lambert W 함수를 이용하면 M_{opp} 를 다음과 같이 구할 수 있다 [12].

$$M_{opp} = K \exp \left[-\left\{ 2cW \left\langle \frac{a}{2c} \sqrt{bK} \exp \left(-\frac{a}{2c} \right) \right\rangle + a \right\} / c \right] \quad (24)$$

이다. 여기서 $W \langle \bullet \rangle$ 는 Lambert W 함수를 나타내고, $a = \gamma_{th} N_0$, $b = \Omega_{Sk} / \Omega_{kD}$, $c = P_T$ 이다.

IV. 수치적인 예

그림2는 전체 네트워크의 노드 수(N)가 10일 때 전체 네트워크의 신호 대 잡음비와 오수신율을 나타낸 것으로, 실선은 소스 노드 및 기회 송신하는 각 릴레이 노드의 송신전력이 동일한 경우이고, 점선은 본 논문에 의하여 소스 노드 및 기회 송신하는 각 릴레이 노드에 최적의 전력을 할당한 경우이다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 최적의 전력을 할당한 경우가 동일전력 할당한 경우보다 항상 성능이 우수함을 알 수 있다. 같은 의미로 전체 네트워크의 전력(P_T)이 주어졌다면, 목표로 하는 오수신율을 유지하기 위하여 각 송신 노드가 동일한 전력으로 송신할 경우보다 각 송신노드에 최적의 전력을 할당한 경우가 전체 송신전력이 적게 소모됨을 의미한다.

예를 들면, 목표로하는 중단간 오수신율이 1×10^{-3} 을 유지하기 위하여 $\Omega_{Sk} = 0.3$, $\Omega_{kD} = 0.7$ 와 $\Omega_{Sk} = 0.7$, $\Omega_{kD} = 0.3$ 일 경우, 동일전력 할당의 경우 필

요한 신호 대 전력비가 18.8 dB 로 동일하지만 최적전력 할당의 경우는 16.5 dB 및 18.24 dB로 각각 약 2.3 dB 및 0.56 dB의 전력이득이 있다. 그러므로 최적 전력할당의 경우 $\Omega_{sk} = 0.3, \Omega_{kD} = 0.7$ 일 때의 오수신율이 $\Omega_{sk} = 0.7, \Omega_{kD} = 0.3$ 일 때의 오수신율보다 작다. 즉, 최적 전력할당의 경우에는 동일전력 할당 시보다 송신하는 릴레이 수를 증가(그림4 참조) 함으로써 큰 공간 다이버시티 효과를 얻게 되고, 결국 중단 간 오수신율이 감소하게 됨을 의미한다.

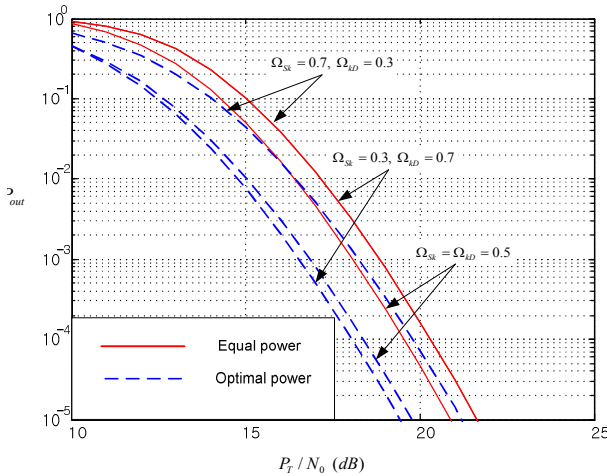


그림 2. SNR 대 오수신율 ($N=10, \gamma_{th}=1$)
Fig. 2. SNR vs. outage probability ($N=10, \gamma_{th}=1$).

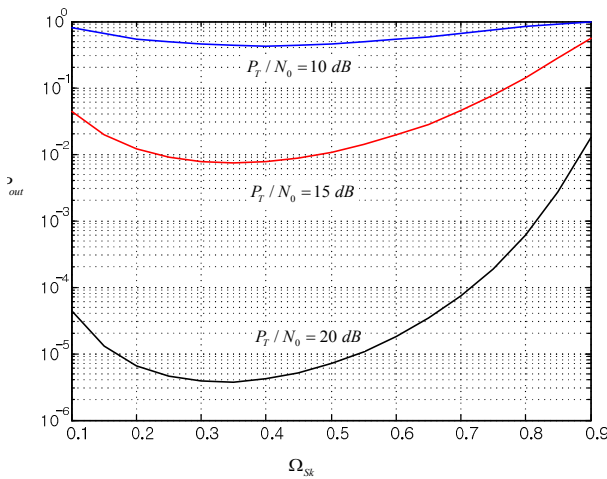


그림 3. 최소 오수신율 ($N=10, \gamma_{th}=1, \Omega_{kD}=1-\Omega_{sk}$)
Fig. 3. Minimum outage probability
($N=10, \gamma_{th}=1, \Omega_{kD}=1-\Omega_{sk}$).

그림3은 소스와 k 번째 릴레이 간의 평균 전력(Ω_{sk})의

변화에 따른 오수신율의 변화를 나타낸 것인데, 여기서 $\Omega_{kD} = 1 - \Omega_{sk}$ 를 가정하였다. P_T/N_0 가 각각 10, 15, 20 dB 일 때 오수신율을 최소로 하는 Ω_{sk} 는 각각 0.39, 0.35, 0.33 이었다.

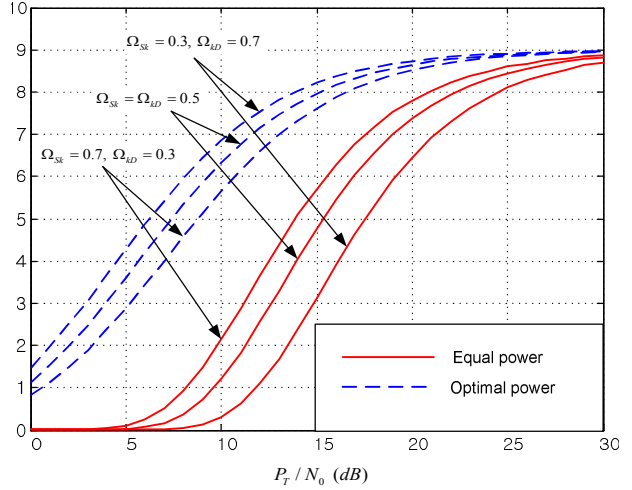


그림 4. SNR 대 평균 송신 릴레이 수 ($N=10, \gamma_{th}=1$)
Fig. 4. SNR vs. no. of average transmit relay nodes ($N=10, \gamma_{th}=1$).

그림4는 전체 네트워크의 노드 수(N)가 10이고 전체 네트워크의 전력이 P_T 로 주어진 경우, 전력 분배방식에 따른 평균 송신 릴레이 수를 비교한 그래프이다. 이 그림도 그림 2와 같이 실선은 모든 송신 노드가 동일한 송신 전력으로 송신하는 경우이고 점선은 최적의 전력을 할당한 경우이다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 임계 SNR이 ($\gamma_{th}=1$)로 정해져 있을 경우 네트워크 전체의 전력이 증가 할 수록 수신한 SNR이 임계값을 넘는 릴레이가 증가 하고, 결국 평균 송신 릴레이 수가 증가하게 된다. 그리고 최적 전력 할당방식은 동일전력 할당 방식보다 항상 송신 릴레이 수가 많아짐을 알 수 있다.

즉, 그림1에서 언급한 바와 같이, 소스와 릴레이 간의 평균 신호 대 잡음비가 작은 경우($\Omega_{sk}=0.3, \Omega_{kD}=0.7$)가 다른 두 가지($\Omega_{sk}=0.7, \Omega_{kD}=0.3$ 및 $\Omega_{sk}=\Omega_{kD}=0.5$)의 경우보다 송신 전력 배분에 의한 평균 송신 릴레이 수가 가장 많은 차이를 보였다. 예를 들면 전체 네트워크의 신호 대 잡음비 (P_T/N_0)가 15 dB인 경우 $\Omega_{sk}=0.3, \Omega_{kD}=0.7$ 일 때 송신 릴레이의 수는 최적 전력 할당의 경우 8.22 개인데 동일전력 할당의 경우는 3.14 개로 약 5.08 개가 차이가 난다. 그러나 $\Omega_{sk}=0.7,$

$\Omega_{kD} = 0.3$ 와 $\Omega_{sk} = \Omega_{kD} = 0.5$ 는 각 경우 송신릴레이 수의 차이는 각각 1.92 개 및 3.21 개이다. 결국 최적 전력 할당의 경우는 소스-릴레이간의 거리가 멀어서(Ω_{sk} 가 작다) 소스-릴레이간의 오수신율이 클 때에는 송신 릴레이 수를 증가시켜 다이버시티 이득을 높이고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과를 정리하면 표1과 같다.

표 1. 최적전력할당 시 전력이득, 평균 송신 릴레이 수 및 전력 할당비 ($N=10, \gamma_{th} = 1$)

Table 1. Power gain, average transmit relays, and power allocation ratio for optimal power allocation($N=10, \gamma_{th} = 1$).

	$\Omega_{sk} = 0.3, \Omega_{kD} = 0.7$	$\Omega_{sk} = \Omega_{kD} = 0.5$	$\Omega_{sk} = 0.7, \Omega_{kD} = 0.3$
전력이득(dB) @ $P_{out} = 1 \times 10^{-3}$	2.3	1.23	0.56
평균송신릴레이 수 ($P_T/N_0 = 15$ dB)	8.22	7.97	7.63
전력할당비 P_S/P_R @ $P_T = 15$ W	0.56	0.38	0.26

특히 이 표에서 보는 바와 같이 소스와 릴레이 간의 평균 신호 대 잡음비가 작은 경우 소스에 더 많은 전력이 할당됨을 알 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 전력이 제한된 기회전송 릴레이 시스템에서 종단 간 오수신율을 최소화 하기 위하여 각 전송 노드들의 송신 전력을 할당하는 방법을 유도하고 몇 가지 예를 통하여 분석하였다.

분석결과 소스와 릴레이 사이의 거리가 멀어서 소스-릴레이간 평균 SNR 이 작은 경우에는 일반적으로 소스 노드에 많은 송신전력을 할당하여 소스-릴레이간 오수신율을 적게한 후, 릴레이-목적지 간에는 다이버시티 이득으로 종단 간 오수신율을 최소화하는 것을 알 수 있었다.

이 연구결과는 전력이 제한된 ad-hoc 네트워크에서 제한된 전력을 이용하여 네트워크의 종단 간 오수신율을 최소로 하기위한 목적으로 활용될 수 있겠다.

참 고 문 헌

- [1] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornel, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," IEEE Trans. on Information Theory, vol.50, no.12, pp.3062-3080, Dec. 2004.
- [2] J. Hu, and N. C. Beaulieu, "Performance analysis of decode-and-forward relaying with selection combining," IEEE Communications Letters, vol.11, no.6, pp.489-491, June 2007.
- [3] R. Nikjah and N. C. Beaulieu, "Achievable rates and fairness in rateless coded decode-and-forward half-duplex and full-duplex opportunistic relaying," Proceedings of ICC08, pp.3701-3707, May 2008.
- [4] J. Luo, R.S. Blum, L. J. Cimini, L. J. Greenstein, A. M. Haimovich, "Decode-and-Forward cooperative diversity with power allocation in wireless networks," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol.6, no.3, pp.793-799, Mar. 2007.
- [5] M. O. Hasna, M-Slim Alouini, "Optimal power allocation for Relayed transmissions over Rayleigh-fading channels," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol.3, no.6, pp.1999-2004, Nov. 2004.
- [6] Aggelos Bletsas, Hyundong Shin, Moe Z. Win, "Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol.6, no.9, pp.3450-3460, Sep. 2007.
- [7] J. L. Vicario, A. Morell, A. Bel, and G. Seco-Granados, "Optimal power allocation in opportunistic relaying with outdated CSI," Proceedings of Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, pp.49-53, July 2008.
- [8] V. Emamian, P. Anghel, M. Mostafa Kaveh, "Multi-user spatial diversity in a shadow-fading environment," Proceedings of Vehicular

- Technology Conference 2002-Fall, vol.1, pp. 573-576, Sept. 2002.
- [9] A. Ribeiro, X. Cai, G. B. Giannakis, "Symbol error probabilities for general cooperative links," IEEE Trans. on Wireless Communication, vol.4, no.3, pp.1264-1273, May 2005.
- [10] Davis Gesbet, Mohamed-S. Alouini, "How much feedback is multi-user diversity really worth?," Proceedings of International Conference on Communications, vol.1, pp.234-238, June 2004.
- [11] A. Goldsmith, *Wireless communications*, Ch.7, Cambridge University Press, 2005.
- [12] Matlab, The mathworks Inc.

저자 소개

김 남 수(정회원)



- 1986.7 - 1994.2 : ETRI 이동통신 연구단 무선기술 연구실장 역임
 - 1991.2 : 연세대학교 전자공학과(공학박사)
 - 1991.1-1991.10 : BNR (Bell Northern Research) 방문연구원
 - 2002.1-2003.1: NJIT (New Jersey Institute of Technology) 교환교수
 - 1994.3 - 현재 : 청주대학교 전자정보공학부 교수
 - 2006.1 - 2007.12 : 청주대학교 학술정보처장
- <주관심분야: 무선 이동통신 채널, 이동통신시스템 설계, 디지털 변복조시스템>